УДК 621.315.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОПИТОЧНЫХ И ЗАЛИВОЧНЫХ ЛАКАХ

А.Н. Дудкин, В.С. Ким, С.С. Марьин

Томский политехнический университет
E-mail: mariyn@elti.tpu.ru

Проведен анализ влияния различных факторов (условий запекания и старения) на уровень внутренних механических напряжений в пропиточных (ФЛ-98 и БТ 987) и заливочных (УР-231) составах. Получено, что при запекании лаковых покрытий в соответствии с техническими условиями величина внутренних механических напряжений невелика и слабо меняется при температурном старении.

Введение

При проектировании изоляции электрических машин необходимо учитывать взаимное влияние компонентов изоляции друг на друга, в том числе и влияние пропитывающего состава на изоляцию эмаль-провода. В работе [1] отмечается, что взаимодействие между пропиточным материалом и эмалированным проводом в системе может быть обусловлено либо физико-химическим, либо физико-механическим, либо тем и другим процессами.

Одним из видов взаимного влияния компонентов системы изоляции являются внутренние механические напряжения ($\sigma_{\text{ВН}}$). Пропиточный материал в отвержденном состоянии, эмальпленка и проводник образуют сопряженную систему. Эти элементы конструкции связаны друг с другом силами адгезии. При изменениях температуры или воздействии внешних нагрузок они вынуждены деформироваться вместе. В то же время, деформации в сопряженной системе затруднены именно вследствие разности теплофизических и физико-механических параметров, таких как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), модуль упругости и других свойств компонентов системы изоляции. Вследствие различия физико-механических параметров материалов, составляющих систему изоляции, в них неизбежно возникают внутренние механические напряжения, которые могут привести к разрушению межвитковой изоляции. Под действием внутренних напряжений в межвитковой изоляции образуются различного рода дефекты (трещины, расслоения), которые снижают пробивное напряжение в процессе испытания и эксплуатации.

Внутренние механические напряжения не являются физическим параметром полимерных материалов в отличие от таких характеристик, как модуль упругости или ТКЛР. Они определяются не только физико-механическими свойствами полимерного материала, но также зависят от соотношения геометрических параметров компонентов системы (диаметра провода, величины изоляционного промежутка), режима отверждения и других факторов. При этом с точки зрения развития внутренних напряжений особый интерес представляют внутренние механические напряжения в пропитывающем составе, т.к. образование трещины в межвитковой системе изоляции, происходит именно в нем.

Целью данной работы является измерение величины $\sigma_{\text{ВН}}$ в пропиточных (ФЛ-98 и БТ 987) и заливочных (УР-231) составах, а также исследование влияния на $\sigma_{\text{ВН}}$ условий запекания и старения лакового покрытия. Работа выполнена в ЭЛТИ Томского политехнического университета совместно с ФГУП НПЦ «Полюс» (г. Томск).

Материалы и методика эксперимента

Покровные и пропиточные составы УР-231, ФЛ-98 и БТ 987, технологические режимы их запекания, используемые на производстве, а также режимы старения для исследования внутренних механических напряжений были предоставлены ФГУП НПЦ «Полюс».

Лак ФЛ-98 (ГОСТ 12294-66) представляет собой смесь растворов смол алкидной и бутоксикрезолоформальдегидной в смеси ксилола и уайт-спирита в соотношении 1:1. В лаке содержится 10...15 вес. %

бутанола. Лак термореактивный, обладает высокой цементирующей способностью и маслостойкостью, условная вязкость по вискозиметру ВЗ-4 при 20±0,5 °С составляет 35...60 с. Лак предназначен для пропитки обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В при необходимости получения повышенной цементирующей способности.

Битумный пропиточный лак БТ 987 (ГОСТ 6244-70), рабочая вязкость 18...22 с по ВЗ-4 при 20±5 °С. В случае необходимости лак разбавляется ксилолом или смесью ксилола с бензином (1:1). Применяется для пропитки обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости А, Е и В общего назначения

Общим недостатком лаков ФЛ-98 и БТ 987 является необходимость длительной запечки в обмотках электрических машин.

Лак УР-231 (ТУ 6-21-14-90) предназначен для нанесения с целью сохранения влагостойкости изоляции статических преобразователей и аналогичных изделий в процессе хранения и эксплуатации. Лак поставляется в виде двух компонентов:

1. Лак УР-0231 (алкидно-эпоксидная смола Э-30, изготовленная на смеси тунгового и льняного масел).
2. 70 % раствор диэтиленгликольуретана (ТУ 113-38-115-91) в циклогексаноне.

Для приготовления лака УР-231 необходимо смешать полуфабрикатный лак УР-0231 с раствором диэтиленгликольуретана (ДГУ) в соответствии 100 в.ч. лака и 18 в.ч. раствора ДГУ, тщательно перемешать и выдержать 30 мин. После смешивания состав должен быть прозрачным. Вязкость лака по вискозиметру ВЗ-4 должна быть равной 13...15 с. В случае повышенной вязкости лака разрешается разбавлять его до рабочей вязкости смесью ксилола и бутилацетата в соответствии объему. Срок службы лака УР-231 после введения продукта ДГУ составляет 6 ч, после чего допускается 1–2 разовое разбавление лака до рабочей вязкости в течение следующих 6 ч.

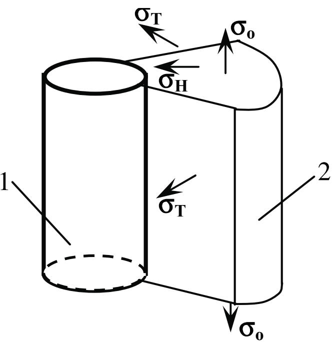


Рисунок. *Составляющие внутренних механических напряжений в системе: 1) эмалированный провод, 2) пропиточный состав.* $\sigma_о$, $\sigma_Н$, $\sigma_Т$ *– осевые, нормальные (радиальные) и тангенциальные (касательные) напряжения*

Для измерения величины внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных составах применен консольный метод [2]. Этот метод основан на измерении отклонения от первоначального положения свободного конца консольно закрепленной упругой металлической пластины с полимерным покрытием под влиянием внутренних напряжений в покрытии. Возникновение внутренних напряжений в пленке полимерного покрытия на поверхности субстрата, схематически показано на рисунке.

По отношению к поверхности контакта адгезива с субстратом, направление внутренних напряжений может быть различным. Внутренние напряжения $\sigma_{ВН}$ являются векторной суммой тангенциальной $\sigma_Т$ и нормальной $\sigma_Н$ составляющих. Вклад $\sigma_Н$ по сравнению с $\sigma_Т$ обычно мал. Зная модуль упругости материала подложки E (для стали E=1,96·10^5 МПа), величина $\sigma_{ВН}$ может быть рассчитана по измеренной величине отклонения свободного конца пластины [3]:

$$\sigma_{ВН} = \frac{\Delta h E h_к^3}{3l^2 \Delta h_к (h_к + \Delta h_к)}, \quad (1)$$

где Δh – отклонение пластины-подложки от первоначального положения, м; l – длина полимерного покрытия, м; $h_к$ – толщина пластины-подложки, м; $\Delta h_к$ – толщина полимерного покрытия, м. Чувствительность метода составляет ~0,3 кг/м^2.

При выборе геометрии образцов и технологии их изготовления были приняты во внимание следующие основные требования. Во-первых, в реальных конструкциях толщина пропиточного и заливочного материала находится в пределах 0,03...0,1 мм, поэтому толщина образцов для испытаний принята равной 0,1 мм. Во вторых, технология запекания заливочного и пропиточного состава должна быть максимально приближенной к используемой на производстве, поэтому время и температура запекания соответствовали существующим ТУ.

Металлическая подложка представляет собой две пластины из нержавеющей стали 1Х18Н9Т размером 0,08×0,015 м, толщиной 0,1 мм, (пластина-подложка) и 1 мм (пластина-основание), соединенные точечной сваркой через стальную прокладку из нержавеющей стали размером 0,02×0,015 м, толщиной 1 мм. В пластине-основании имеются 4 отверстия диаметром 10 мм для измерения толщины покрытия. Для снятия напряжений в металле перед применением пластины подвергались термической обработке в муфельной печи при 450 °С в течение 3 ч. При изготовлении образцов пропиточный и заливочный материал наносился на металлическую подложку беличьей кистью № 6. Для устранения статистической погрешности каждое измерение проводилось на десяти образцах. Измерения проводились при двух режимах: в исходном состоянии и после старения при повышенной температуре в течение 100 ч.

Результаты эксперимента

В данной работе запекание образцов проводилось в течении 4 ч при температурах 140 и 160 °С. Кроме того, для каждой температуры запекания, после образования лакового покрытия, половина

образцов охлаждалась до температуры 25 °С быстро (~30 град/мин), а вторая половина образцов охлаждалась медленно (~5 град/мин). Результаты измерения величины внутренних механических напряжений представлены в табл. 1. Быстрое (~5 град/мин) охлаждение образцов соответствует технологии производства, принятой на ФГУП НПЦ «Полюс». Как видно из табл. 1, скорость охлаждения практически не влияет на величину $\sigma_{ВН}$, что объясняется высокой эластичностью рассмотренных составов.

Таблица 1. *Зависимость $\sigma_{ВН}$ (МПа) от режима полимеризации пропиточных составов ФЛ-98 и БТ 987. 1-й режим полимеризации соответствует температуре запекания образцов 140 °С, 2-й – 160 °С. $V_{ОХЛ}$ – скорость охлаждения образцов*

	1-й режим		2-й режим	
$V_{ОХЛ}$, °С/мин	30	5	30	5
ФЛ-98	0,11	0,057	1,611	0,308
БТ 987	7,34	6,70	7,38	7,10

Старение образцов проводилось при 170 °С в течение 100 ч. Результаты изменения $\sigma_{ВН}$ в результате старения представлены в табл. 2. Как видно из приведённых результатов, в процессе старения наблюдается слабо выраженная тенденция к уменьшению величины $\sigma_{ВН}$. Однако во всех случаях отмечается немонотонное спадание $\sigma_{ВН}$. Наличие максимума, возможно, связано с тем, что процессы полимеризации и релаксации внутренних напряжений во время старения протекают одновременно. На начальных этапах полимеризационные процессы в лаковом покрытии преобладают, а по мере завершения структурообразования, преобладающими становятся релаксационные процессы.

Таблица 2. *Изменение $\sigma_{ВН}$ (МПа) в ходе теплового старения образцов пропиточных составов ФЛ-98 и БТ 987. Режим охлаждения I соответствует скорости охлаждения 5 град/мин, II – 30 град/мин*

Состав	Режим охлаждения	Время старения, ч					
		30	45	60	75	85	100
ФЛ-98	I	0,390	0,233	0,296	0,401	0,440	0,382
	II	1,405	1,216	1,438	1,461	1,505	1,500
БТ 987	I	0,456	2,982	3,088	1,18	1,428	1,092
	II	1,229	3,655	4,514	4,919	1,290	1,750

Таблица 3. *Зависимость $\sigma_{ВН}$ от количества слоев покровного лака УР-231 (I – скорость охлаждения 5 град/мин, II – 30 град/мин)*

Режим охлаждения	Внутренние механические напряжения ($\sigma_{ВН}$), МПа		
	2 слоя	3 слоя	4 слоя
I	0,389	0,832	0,794
II	0,612	0,395	0,266

Лак УР-231 предназначен для нанесения покрытий с целью сохранения влагостойкости изоляции статических преобразователей и аналогичных изделий в процессе хранения и эксплуатации. Покровный лак УР-231 наносится последовательно в 3–4 слоя. После нанесения каждого слоя образцы запекаются в течение 4 ч. Результаты измерения $\sigma_{ВН}$ для лаковых покрытий различной толщины представлены в табл. 3. Как видно из табл. 3, внутренние напряжения в покрытии невелики и не могут оказывать существенного влияния на механические свойства покрываемых лаком деталей.

Развитие сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин начинается с дефекта в пропиточном составе. При этом важным фактором является величина $\sigma_{ВН}$ [4]. Полученные в данной работе результаты показывают, что на величину внутренних механических напряжений существенное влияние оказывает степень полимеризации лакового покрытия. В зависимости от количества задействованных в ходе запекания функциональных групп изменяется характерное время релаксации и, соответственно, время, необходимое для уменьшения внутренних напряжений. В данной работе условия запекания были максимально приближены к производственным. В частности, запекание лака ФЛ-98 в соответствии с ТУ привело к невысокой степени полимеризации. Это, в свою очередь, приводит к малым по абсолютной величине внутренним механическим напряжениям и к незначительным изменениям $\sigma_{ВН}$ при старении. При условии сохранения высокой цементирующей способности за счёт малого времени релаксации это позволяет избежать нарушений сплошности, вызванных высокими внутренними напряжениями. Таким образом, в зависимости от назначения лакового покрытия, для выявления оптимальных параметров запекания следует учитывать не только степень полимеризации лакового покрытия, но и его механические характеристики, а также условия полимеризации, включая температурные режимы, способы нанесения покрытия и качество подготовки поверхности субстрата.

Выводы

1. Абсолютная величина $\sigma_{ВН}$ в слое пропиточного лака невелика (табл. 1). Она примерно на порядок меньше внутренних напряжений, возникающих в аналогичном слое пропиточных компаундов. Изменение температуры запечки образцов на 20° не привело к существенным изменениям величины $\sigma_{ВН}$, но есть тенденция к возрастанию $\sigma_{ВН}$ с ростом температуры запечки. Наблюдается общая тенденция увеличения $\sigma_{ВН}$ с ростом скорости охлаждения отверждённого лакового покрытия. Бóльшая скорость охлаждения соответствует тепловому удару, при котором происходит нарушение режима полимеризации, и структурирование лакового покрытия протекает более хаотично.
2. Не обнаружено заметного влияния старения на величину внутренних напряжений в лаковых покрытиях (табл. 2). Возможно, это объясняется малым временем старения и высокой эластичностью лаковых плёнок. В любом случае

можно отметить высокую способность рассмотренных пропиточных лаков сохранять свои механические свойства при продолжительном тепловом воздействии.

3. Величина $\sigma_{вн}$ в слое покровного лака УР-231 мала и сравнима с внутренними напряжениями, возникающими в пропиточных лаках. Увеличение толщины лакового покрытия не приводит к заметным изменениям величины $\sigma_{вн}$ вплоть до четырёх слоёв лака. Полученные отклонения величин внутренних напряжений для слоёв различной толщины лежат в пределах погрешности эксперимента. Наблюдается общая тенденция к увеличению $\sigma_{вн}$ с ростом скорости охлаждения отверждённого лакового покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Санжеровский А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий. – М.: Наука, 1974. – 154 с.
3. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
4. Дудкин А.Н., Леонов А.П., Марьин С.С. О механизме образования сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. тезисов докл. XVI научно-техн. конф. – Томск: НПЦ «Полюс», 2000. – С. 232–233.

УДК 621.313.017.7